

ODORAMANITA: DISCRIMINACIÓN DE SETAS CON SISTEMAS OLFATIVOS ARTIFICIALES

Francisco Portalo¹, José Pedro Santos², Carlos Sánchez¹, Patricia Arroyo¹, Jesús Lozano¹

¹Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Extremadura. Av. Elvas s/n. 06006 Badajoz

²Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información. CSIC. C/ Serrano 144. 28006 Madrid

Email: jesuslozano@unex.es

Resumen

Se describen en esta comunicación los primeros pasos para implementar dispositivos inteligentes capaces de discriminar especies de setas utilizando sistemas olfativos artificiales, también conocidos como narices electrónicas. Se orientan las investigaciones a desarrollos accesibles, de bajo coste, portables y con autonomía suficiente en consumo y conectividad, para utilizar tanto en prácticas profesionales como por parte de aficionados a la micología. Se comienza estableciendo una serie de protocolos de recogida, manipulación, y conservación de individuos, centrados en las especies del género Amanita presentes en el suroeste de la península ibérica, y especialmente en aquellas singularmente significativas por su comestibilidad, y principalmente por su toxicidad. Los resultados obtenidos han sido, aunque no definitivos, alentadores para continuar trabajando en esta línea de investigación, que puede aportar soluciones de carácter industrial en procesos de clasificación, conservación y obtención de aromas de setas, así como en el diseño de dispositivos más orientados a la educación medioambiental y el ecoturismo.

Palabras clave: Micología, Amanita, nariz electrónica, toxicidad, ecoturismo.

1 INTRODUCCIÓN

Cada vez son más los procesos en los que está presente la tecnología de reconocimiento de olores utilizando una nariz electrónica [1]. En lo que pretende ser una ampliación de esta línea de trabajo, el proyecto Odoramanita tiene por objetivo final la diferenciación, mediante dispositivos electrónicos que utilizan sensores de diversas tecnologías y técnicas de IA (Inteligencia Artificial), de especies de setas,

principalmente comparando las sustancias volátiles que de éstas emana. Desde 1980, la nariz electrónica ha sido aceptada como un instrumento que comprende un conjunto de sensores electroquímicos de gas heterogéneos, y un sistema de reconocimiento de patrones [2]. Por lo tanto, una vez que se recogen los datos de los sensores, el sistema realiza un procesamiento analizando y clasificándolos.

Uno de los puntos claves en los que se basa este estudio, es en la capacidad demostrada por ciertos animales para detectar sustancias volátiles, y de esta manera encontrar rastros de personas, sustancias que emanan de productos naturales, 'oler' enfermedades en los humanos¹, localizar explosivos [3], etc. Entre los aromas naturales que son capaces de diferenciar estos animales, se encuentran los desprendidos por algunos tipos de hongos, utilizándose en su recolección una vez entrenados. Esta circunstancia sugiere la existencia de matices olorosos entre las distintas especies de setas. En la literatura existente, principalmente guías de campo [4], viene reflejado el atributo olor, generalmente en el apartado carne, y aunque en ocasiones resulta un matiz importante para la clasificación de ciertas especies, la descripción suele ser muy vaga y generalista, no pudiéndose considerar un hecho diferencial de la especie en cuestión.

Por otra parte, la región suroeste de la península ibérica posee un elevado potencial, cultural e industrial, derivado del espacio micológico. Este hecho se constata por el aumento de las actividades de diferentes índole que genera el reino fungi², y también porque cada vez son más las industrias basadas en productos micológicos que exportan sus productos a toda Europa³. A pesar de ello, en la región de Extremadura aún no se ha promulgado⁴ una ley que la

¹Blat, el perro que detecta el cáncer de pulmón con su olfato. Noticia de prensa: El periódico 10 de Agosto de 2017. Accesible en internet el 18 de junio de 2018 desde: <https://www.elperiodico.com/>.

²Actividades externas SMI. Accesible en internet el 18 de junio de 2018 desde: <http://micoex.org/actividades-externas>

³Noticia Diario HOY. Accesible en internet el 18 de junio de 2018 desde:

<http://www.hoy.es/agro/extremadura-exporta-europa-20170707223916-ntvo.html>.

⁴Aunque anunciada, aún no ha salido.

regule esta actividad y adapte la normativa nacional⁵ a las peculiaridades locales. Cabe pensar que, aun siendo una actividad tradicional, las autoridades también puedan considerar las posibles consecuencias que podría ocasionar un error de reconocimiento, dada la similitud entre especies mortales y comestibles como se observa en la Figura 1. En este sentido encaminar estas investigaciones a la discriminación de setas potencialmente peligrosas mediante dispositivos electrónicos específicos puede aportar un plus de seguridad a estas actividades.











Figura 1: Fotografía tomada del libro *La setas del Parque Natural Sierra de Aracena y Picos de Aroche* de Romero de la Osa

El desarrollo de dispositivos de nariz electrónica 'dedicados', es decir orientando su diseño a la captación de olores de setas, que fueran fáciles de usar, de bajo coste y capaz de proporcionar un procedimiento de análisis discriminatorio rápido y fiable, se podrían utilizar por parte de aficionados a la micología y también por las industrias agroalimentarias de recolección, selección, y almacenaje de setas, suministrando una información extra que posibilitará la mejora del proceso [5]. En este sentido se puede indicar que ya se han utilizado las narices electrónicas en el estudio de mejoras de procedimientos de conservación de setas cultivadas [6].

2 OBTENCIÓN, MANIPULACIÓN CONSERVACIÓN Y MUESTREO

Como se ha comentado, inicialmente este proyecto de investigación se centra en setas del género *Amanita* presentes en el suroeste de la península ibérica. Entre las especies que abundan en esta zona, se pueden destacar la *Amanita caesarea* y *ponderosa* (principalmente primaveral), que son muy apreciadas por su reconocido valor gastronómico, pero también nos encontramos con las *Amanita phalloides*, *muscaria*, o *verna* (principalmente primaveral) de alta toxicidad. En algunos casos su ingesta puede ser

Tabla 1: Especies analizadas en este trabajo

| <u>Caesarea</u> | <u>Muscaria</u> | <u>Phalloides</u> |
|---|---|--|
| <p>Oronja</p>  <p>Taxonomía</p> <p>Reino: Fungi Filo: Basidiomycota Clase: Agaricomycetes Orden: Agaricales Familia: Amanitaceae Género: Amanita Especie: <i>A. caesarea</i></p> | <p>Falsa oronja</p>  <p>Taxonomía</p> <p>Reino: Fungi Subreino: Dikarya Filo: Basidiomycota Subfilo: Agaricomycotina Clase: Agaricomycetes Subclase: Agaricomycetidae Orden: Agaricales Familia: Amanitaceae Género: Amanita Especie: <i>A. muscaria</i></p> | <p>Amanita phalloides</p>  <p>Estado de conservación</p> <p>No amenazado</p> <p>Taxonomía</p> <p>Reino: Fungi División: Basidiomycota Clase: Agaricomycetes Subclase: Agaricomycetidae Orden: Agaricales Familia: Amanitaceae Género: Amanita Especie: <i>A. phalloides</i></p> |
| <p>Su carne tiene un sabor y olor muy agradables, que lo convierten en un comestible muy apreciado, pudiendo consumirse incluso cruda.</p>  |  <p>En dosis muy altas, tiene un gran efecto neurotóxico, mientras que si está seca su potencial alucinógeno es mucho más alto. En grandes cantidades puede inducir al coma.</p> |    <p>Es la seta más mortífera para los humanos, habiendo causado el fallecimiento de numerosas personas, ya que las toxinas actúan sobre el hígado y los riñones, dando lugar al fallo hepático, y además el síndrome falojdiano es un síndrome de acción lenta que dificulta identificar el origen de la intoxicación.</p> |

⁵Real Decreto 30/2009, de 16 de enero, por el que se establecen las condiciones sanitarias para la comercialización de setas para uso alimentario.

un vial, de manera que los volátiles que son desprendidos queden conservados en la zona superior del recipiente formando así una muestra gaseosa en equilibrio, representativa del olor de la mismas. Seguidamente, a través de unas aberturas para la entrada y salida del gas portador, en esta caso aire filtrado, se realiza el transporte de los volátiles desprendidos de la muestra hacia los sensores.

3.2 SENSORES

El corazón del instrumento son unos micros sensores de gases resistivos. La nariz utilizada, admite hasta cuatro micros sensores integrados en un solo chip. Se han diseñado para este prototipo varias celdas en aluminio para contener diferentes tipos de arrays de sensores: sensores comerciales fabricados por e2v, Cambridge CMOS y otro no comercial, desarrollado por el GRIDSEN en colaboración con el Centro Nacional de Microelectrónica de Barcelona [7]. Estos arrays consisten en cuatro sensores individuales de película delgada de óxido de estaño suspendidos sobre estructuras micro mecanizadas de silicio que contienen una resistencia calefactora y contactos para medir la resistencia de la película sensible. Cada

sensor puede operar a una temperatura distinta hasta un máximo de 500 °C.

En la Figura 3 se muestran algunas de las celdas fabricadas con sus respectivos sensores.



Figura 3: Celdas de los sensores. Izquierda: e2v, centro: sensor CNM, derecha: sensor MICROSENS

La celda de los sensores está conectada a una electroválvula de tres vías (SMC S70_ES) que permite seleccionar entre dos entradas: una para la muestra a medir y otra para un gas de referencia en nuestro caso aire filtrado mediante un filtro de carbón activo. La

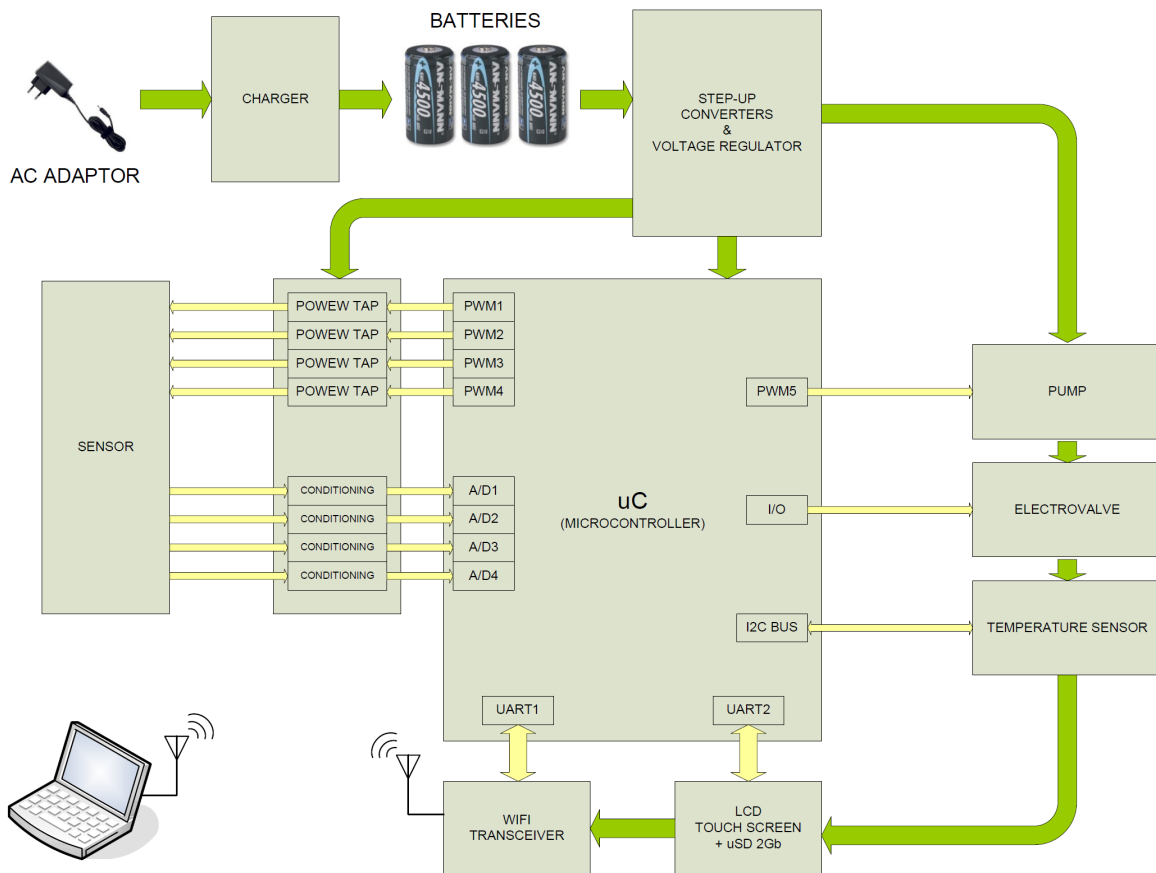


Figura 4: Esquema electrónico del sistema diseñado

nariz también dispone de sensores de humedad relativa y temperatura (Sensirion SHT15), una microbomba (Rietschle Thomas model 2002) y un caudalímetro (SMC PFMV5). En la Tabla 2 se muestran los rangos de medida de los distintos sensores.

Tabla 2:Rango de medida de los sensores

| Parámetro | Rango |
|----------------------|---------------------------------|
| Resistencia sensores | 10 – 5 x 10 ⁷ ohmios |
| Humedad relativa | 0 – 100 % |
| Temperatura | -40 – 124 °C |
| Caudal | 0 – 500 mL/min |

3.3 SISTEMAS DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL

En la figura 4 se muestra un esquema de la electrónica del sistema. El sistema es gobernado por un microcontrolador con 16 Kb de RAM y 128 Kb de memoria FLASH. Posee varios convertidores analógico-digital para la medida de los sensores y varias salidas con modulación de anchura de pulso (PWM) para la calefacción de los sensores. Los principales parámetros de medida así como una gráfica con el histórico de los últimos valores se muestran en una pantalla LCD táctil, lo cual permite también la selección de diferentes parámetros de configuración. Se dispone de un transmisor WIFI para las comunicaciones inalámbricas. La resistencia de los sensores es medida mediante un circuito electrónico basado en un amplificador operacional. Debajo de la placa electrónica de control se ubican las baterías recargables (3 x 4500 mAh) que proporcionan una autonomía de unas ocho horas al sistema.



Figura 3: Interfaz de usuario

La nariz se controla a través de un programa desarrollado en Testpoint, un lenguaje de programación orientado a objeto. Una captura de pantalla de la interfaz de usuario se muestra en la Figura 3. En el gráfico inferior se muestran las

resistencias de los sensores de gases. En la parte superior se muestran las respuestas. Estas se calculan como la razón de resistencias entre el gas de referencia y la muestra. En esta interfaz simplificada se programan el número de muestras a medir y los tiempos de conmutación de la electroválvula. Existe otra pantalla donde se pueden modificar los valores iniciales de la medida (tiempo entre medidas, calefacción de los sensores y caudal).

3.4 PROCESADO DE LA SEÑAL

Una de las piezas angulares en un sistema olfativo artificial la constituye el conjunto de técnicas que tratan la información obtenida a través de la matriz de sensores químicos de estado sólido. El procesado de señal multivariable que se integra en las narices electrónicas actuales tiene su origen en la química analítica, también denominada “quimiometría”. El procesado de los datos comienza después de que las señales de los sensores han sido adquiridas y almacenadas en el ordenador. Los datos se guardan en ficheros de texto, con separación de los datos por comas (formato csv¹⁰). De esta forma, se almacena el tiempo de la medida, las respuestas de los sensores y otros parámetros como temperatura ambiente, estado de las electroválvulas y caudalímetros, etc.

El objetivo principal del procesado de señal es extraer la información relevante para obtener la respuesta deseada, minimizando las interferencias que pueda introducir la matriz de sensores. Las respuestas de los sensores pueden ser utilizados como una “huella electrónica” para caracterizar un amplio rango de olores o compuestos orgánicos volátiles utilizando un sistema de reconocimiento de patrones. Este proceso puede ser dividido en cuatro etapas: extracción de características y pre-procesado de la señal, reducción de la dimensionalidad, clasificación y toma de decisión [8]. Los programas han sido realizados con Matlab y se ha utilizado las toolboxes de SignalProcessing y Neural Networks.

El pre-procesado de los datos medidos de los sensores se ha realizado mediante el algoritmo de resistencia relativa (RR) en el cual la respuesta de cada sensor se calcula dividiendo el valor estacionario de la respuesta de cada sensor frente al valor del gas de referencia. La siguiente etapa tiene como objetivo reducir la dimensionalidad de los datos extraídos. Se utilizará para este fin el análisis de componentes principales (PCA). El PCA es una potente técnica de reconocimiento de patrones, no supervisada y lineal basada en la expansión de Karhunen-Loeve [9]. El método PCA reduce la redundancia o correlación que exista en las respuestas de los sensores. Normalmente

¹⁰Ficheros CSV, del inglés *.comma-separated values*.

la n-dimensionalidad del problema se reduce a los dos primeros auto vectores (primeras dos componentes principales) que contienen la máxima información [10 – 12].

El objetivo final del sistema de Reconocimiento de Patrones diseñado en este trabajo es el etiquetar de forma automática patrones de los cuales desconocemos su clase, es decir: clasificación. Para este tipo de tareas, hace tiempo que las redes neuronales artificiales ocupan un lugar de privilegio. Este tipo de algoritmos, cuya topología está inspirada en las redes neuronales biológicas, ajustan sus modelos de forma experimental, sin necesitar un conocimiento previo de las características de los datos que debe procesar ni de los mecanismos que los producen. Además, su forma matemática de operar no está restringida a relaciones y procesos lineales. Para la implementación de los algoritmos de las tareas de clasificación se ha utilizado una red *feedforward* con aprendizaje *backpropagation* (una red con funciones de base radial).

El perceptrón multicapa es una red neuronal artificial (RNA) formada por múltiples capas, esto le permite resolver problemas que no son linealmente separables. El perceptrón multicapa puede ser totalmente o localmente conectado. En el primer caso cada salida de una neurona de la capa “i” es entrada de todas las neuronas de la capa “i+1”, mientras que en el segundo cada neurona de la capa “i” es entrada de una serie de neuronas (región) de la capa “i+1”. Las capas pueden clasificarse en tres tipos: capa de entrada (constituida por aquellas neuronas que introducen los patrones de entrada en la red, en nuestro caso los valores de los sensores), capas oculta (formada por aquellas neuronas cuyas entradas provienen de capas anteriores y cuyas salidas pasan a neuronas de capas posteriores) y capa de salida (neuronas cuyos valores de salida se corresponden con las salidas de toda la red e indican el valor de clasificación de la misma). La propagación hacia atrás del error (también conocido como regla delta generalizada), es el algoritmo generalmente utilizado en el entrenamiento de estas redes.

Las redes de base radial son un tipo de redes de neuronas artificiales que calculan la salida de la función en función de la distancia a un punto denominado centro. Al igual que con los perceptrones multicapa, sirven como aproximadores universales. La función de base radial es una función que calcula la distancia euclídea de un vector de entrada x respecto de un centro c, de tal manera que resulta la siguiente función:

$$f(\mathbf{x}) = (||\mathbf{x} - \mathbf{c}_i||) \quad (1)$$

A cada neurona de la capa de entrada le corresponde una función de base radial $\Phi(\mathbf{x})$ y un peso de salida w_i .

El patrón de salida ingresa a una neurona de salida que suma las entradas y da como resultado una salida. La función de una red RBF final resulta:

$$F(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N w_i \Phi(||\mathbf{x} - \mathbf{c}_i||) \quad (2)$$

Las redes RBF tienen una construcción rígida de tres capas: Capa de entrada, capa oculta y capa de salida como se observa en la Figura 4.

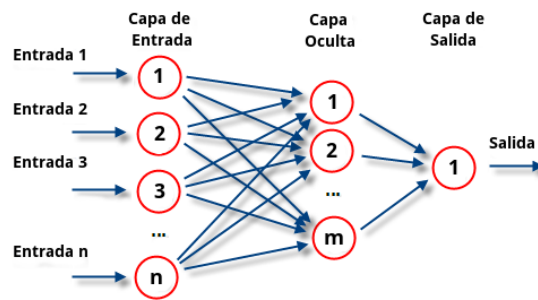


Figura 4: Red Neuronal (wikipedia.org)

Para determinar la validez de los modelos de clasificación con redes neuronales es necesario realizar predicciones de medidas de las que se sabe el valor correcto de salida para poder comparar la estimación realizada con el valor real. Este paso final en el reconocimiento de patrones permite la estimación de errores o rendimientos del modelo entrenado mediante técnicas de validación. En este trabajo, debido a la dificultad de obtener una gran cantidad de medidas en algunos de los experimentos y para sacar más rendimiento a las medidas obtenidas, se han utilizado validaciones cruzadas de orden 1 (también denominadas leave-one-out), lo que supone haber generado tantas redes como medidas se disponen. Esta filosofía no está pensada para proponer un modelo concreto para la clasificación de muestras o para la predicción de cada parámetro, sino para probar la validez de la aproximación.

4 RESULTADOS

Las muestras que se han utilizado para el proceso de medición han sido de tres tipos distintos de setas del género Amanita: phalloides, caesarea, y muscaria. Una vez recolectadas se procesaron como se indicó en el apartado 2 y se mantuvieron conservadas en frío. Posteriormente se cortó un 'quesito' del sombrero de la misma masa de cada seta para utilizar como muestra. Utilizando la técnica de espacio de cabeza dinámico, se realizaron 15 medidas de cada muestra. Antes de comenzar el proceso, el baño térmico, utilizado para mantener a una temperatura constante las muestras, ha sido llenado con agua y programado para estabilizarse a una temperatura de 30° C. Una vez que el baño

térmico ha alcanzado la temperatura deseada, se ha procedido a la medición de las muestras. En total, se han obtenido 45 mediciones, es decir, 15 medidas por seta. El tiempo completo del ciclo de medida ha sido 10 minutos: en primer lugar, el sensor está durante 1 minuto midiendo la muestra y seguidamente, el sensor tiene un tiempo de recuperación de 9 minutos. Este proceso se repite para todas las muestras. Las mediciones se realizaron con un caudal de 150 (L/min) y las temperaturas de operación de los sensores han estado entre 300 y 400°C.

Terminado el ensayo los datos son almacenados en la memoria del ordenador y sometidos a un preprocesado donde se revisan los posibles errores de comunicación u otros. Posteriormente se procede a su análisis. El objetivo final del proceso es determinar si el sistema es capaz de discriminar cada una de las setas analizadas. Para ello, en primer lugar se realiza el Análisis de Componentes Principales (PCA) y así mostrar la distribución de las medidas en un gráfico. En la Figura 5, se representa el PCA de las mediciones de las tres especies de setas, observándose un alto grado de discriminación para cada una de ellas. Se puede asegurar que el sistema ofrece diferentes respuestas para cada una de las muestras, siendo similar para las setas de la misma especie

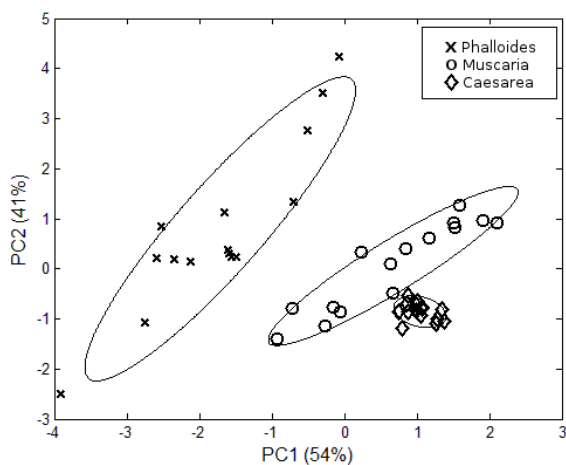


Figura 5: Análisis de Componentes Principales de las medidas de las muestras analizadas

A partir de la observación del PCA, se observa una alineación de los puntos de cada clase, es decir una variación temporal de los datos obtenidos, conocido como deriva en los sensores, que va aumentando a medida que se suceden las medidas. Existen métodos para corregir esta deriva pero no son objeto de este primer trabajo.

Los resultados obtenidos en el PCA son confirmados con la clasificación mediante Redes Neuronales, en el que se ha obtenido un 97,7% de éxito en la validación. En la Tabla 3 se muestra la matriz de confusión

obtenida en la validación utilizando el método LeaveOneOut. Las filas representan las muestras reales, mientras que las columnas indican las muestras clasificadas por las redes neuronales. Se puede observar como únicamente comete un error en la clasificación de una Muscaria como Caesarea.

Tabla 3: Matriz de confusión obtenida en la validación cruzada

| | Phalloides | Muscaria | Caesarea |
|------------|------------|----------|----------|
| Phalloides | 15 | 0 | 0 |
| Muscaria | 0 | 14 | 1 |
| Caesarea | 0 | 0 | 15 |

5 CONCLUSIONES

Se puede decir que el sistema de nariz electrónica utilizado, ha sido capaz de identificar con una tasa de éxito muy significativa los aromas de las tres especies de setas muestreadas. De esta forma se valida inicialmente el modelo y las técnicas empleadas, que podrían ser utilizada también con otras especies y géneros de hongos. De todas formas son muchos los aspectos en los que se debe profundizar para poder generalizar este método que sin lugar a dudas aportaría un procedimiento de bajo coste, con posibilidad de analizar en cualquier ambiente dada su portabilidad, para identificar posibles setas tóxicas y también el estado de maduración y conservación de otros individuos comestibles. Ahora bien, dada las características de la predicción que pretende este sistema, y el riesgo implícito del reconocimiento de setas para su consumo, la solución final debería devolver una respuesta óptima.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la Sociedad Micológica Extremeña su inestimable ayuda en la recolección y clasificación de las muestras, así como su asesoramiento continuo sobre este apasionante mundo de los hongos.

English summary

ODORAMANITA: DISCRIMINATION OF MUSHROOMS WITH AN ELECTRONIC NOSE

Abstract

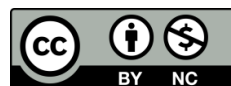
The first steps to implement devices capable of discriminating species of mushrooms using an electronic nose are described in this communication.

The research is oriented to accessible, low cost, portable and with sufficient autonomy, in consumption and connectivity to use both professional practices, as well as amateur mycology. It begins by establishing a series of protocols for collection, handling, and conservation of individuals, focusing on the species of the genus *Amanita* present in the southwest of the Iberian Peninsula, and especially in that singularly important for its edibility and primarily for its toxicity. The results obtained have been, although not definitive, encouraging to continue working in this line of research, which can provide industrial benefits in processes of classification, conservation and transport of mushrooms, as well as in devices more oriented to environmental education and ecotourism.

Keywords: Mycology, Amanita, electronic nose, toxicity, ecotourism.

Referencias

- [1] Pearce, T.C., Schiffman, S.S., Nagle, H.T. And Gardner, J.W. *Handbook of Machine Olfaction: Electronic Nose Technology*. John Wiley & Sons, 2006.
- [2] Wang, H. X., Hu, Z. Q., Long, F. Y., Guo, C. F., Yuan, Y. H., (2016) "Early detection of *Zygosaccharomyces rouxii*-spawned in apple juice by electronic nose combined with chemometrics", *International Journal of Food Microbiology*, 217, pp. 68-78.
- [3] Pardo, L.F.M. and Acosta, A.P. Detección De Explosivos Con La Ayuda De Animales: Una Revisión De La Literatura Científica. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 2009, Vol. 1, No. 1. Pp. 106-118.
- [4] Blanco, A.G. and Rodríguez, J.A.S. *Setas De La Península Ibérica y De Europa*. Everest, 2009.
- [5] Pennazza, G., et al. Electronic Nose and GC-MS Analysis of Volatile Compounds in Tuber *Magnatum Pico*: Evaluation of Different Storage Conditions. *Food Chemistry*, 2013, vol. 136, no. 2. pp. 668-674.
- [6] Lozano, J., Santos, J. P., Gutiérrez, J., Horrillo, M. C., (2007) "Comparative study of sampling systems combined with gas sensors for wine discrimination", *Sensors and Actuators B: Chemical*, 126(2), pp. 616-623.
- [7] Gracia, L., Santander, J., Cané, C., Horrillo, M. C., Sayago, I., Gutierrez, J., (2001) "Results on the reliability of silicon micromachined structures for semiconductor gas sensors", *Sensors and Actuators B: Chemical*, 77(1), pp. 409-145.
- [8] Gutierre-Osuna, R., (2002) "Pattern analysis for machine olfaction: a review", *Sensors Journal, IEEE*, 2(3), pp189-202.
- [9] Kittler, J. Young, P. C., (1973) "A new approach to feature selection based on the Karhunen-Loeve expansion", *Pattern recognition*, 5(4), pp. 335-352.
- [10] McAlermon, P., Slater, J. M., Lowthian, P., Appleton, M., (1996) "Interpreting signals from an array of non-specific piezoelectric chemical sensors", *Analyst*, 121(6), pp. 743-748.
- [11] Nanto, H., Tsubakino, S., Ikeda, M., Endo, F., (1995) "Identification of aromas from wine using quartz-resonator gas sensors in conjunction with neural-network analysis", *Sensors and Actuators B: Chemical*, 25(1), pp. 794-796.
- [12] Rose-Pehrsson, S. L., Grate, J. W., Ballantine Jr, D. S., Jurs, P. C., (1988) "Detection of hazardous vapors including mixtures using pattern recognition analysis of responses from surface acoustic wave devices", *Analytical chemistry*, 60(24), pp. 2801-2811.



© 2018 by the authors.
Submitted for possible
open access publication

under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC-BY-NC 3.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>).